文章编号:1000-4939(2022)06-1108-09

面板堆石坝混凝土面板脱空影响因素敏感性分析

李炎隆[1],卜鹏[1],吴海波[2],温立峰[1],周恒[3],陆希[3]

(1. 西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室,710048 西安;
2. 甘肃省水利水电勘测设计研究院有限责任公司,730000 兰州;
3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司,710065 西安)

摘 要:面板脱空的根本原因是面板与垫层之间的不协调变形,为了探究坝址区地形地质条件及库水位循环升降对面板脱空的敏感性,本研究采用子模型法准确模拟了面板脱空区域的力学响应特性,基于相对变位法研究了河谷宽高比 T、覆盖层厚度 F 及水库水位循环升降次数 K 对混凝土面板脱空的敏感性。研究结果表明:混凝土面板脱空特征值的扩展会随三者的增大呈对数形式增长,其中,河谷宽高比 T 的增大削弱了河谷地形对坝体的约束,从而促进了面板脱空的发展,但当河谷宽高比 T 大于2.0时,其对面板脱空的敏感性会显著降低;覆盖层厚度 F 的增加促进了坝体的不均匀沉降,进而导致面板脱空区域向底部扩展,但面板脱空对覆盖层的敏感性会随着覆盖层厚度 F 的增加而降低;由于面板与堆石体变形特性的差异,在水库水位循环升降作用下,面板脱空区域缓慢扩展,并最终趋于稳定;三者中,F 对面板最大脱空深度的敏感性最高,T 对顺坡向脱空长度的敏感性最高。本研究成果可为面板脱空问题的防治提供相应的理论依据。

关键词:混凝土面板脱空;敏感性分析;河谷宽高比;覆盖层厚度;水库水位循环升降

中图分类号:TV641.4 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2022.06.011

Sensitivity analysis of influencing factors of separation between concrete face and cushion layer of CFRD

LI Yanlong[1], BU Peng[1], WU Haibo[2], WEN Lifeng[1], ZHOU Heng[3], LU Xi[3]

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, 710048 Xi'an, China;
2. Gansu Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Research Institute Co., Ltd., 730000 Lanzhou, China;
3. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, 710065 Xi'an, China)

Abstract: The essential cause of the separation between concrete face and cushion layer is the uncoordinated deformation between concrete face and cushion layer. In order to explore the influence of topographical and geological conditions in the dam site and the cyclic rise-fall of reservoir water level on the separation between concrete face and cushion layer, we use the sub-model method to accurately simulate the mechanical response characteristics of slab void area in this paper, and then explore the sensitivity of width-to-height ratio of valley T, overburden thickness F and cyclic rise-fall times of reservoir water level K on

收稿日期:2021-10-13 修回日期:2022-02-04
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51979224, No. 51909215);西安理工大学博士学位论文创新基金资助项目(No. 252072020)
通信作者:李炎隆。E-mail: liyanlong@xaut.edu.cn
引用格式:李炎隆,卜鹏,吴海波,等. 面板堆石坝混凝土面板脱空影响因素敏感性分析[J]. 应用力学学报,2022,39(6):1108-1116.
LI Yanlong, BU Peng, WU Haibo, et al. Sensitivity analysis of influencing factors of separation between concrete face and cushion layer of CFRD [J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(6): 1108-1116.

the separation between concrete face and cushion layer based on the relative displacement method. The results show that the characteristic value of separation between concrete face and cushion layer increases logarithmically with the increase of the three. The increase of the width-to-height ratio of valley *T* weakens the constraint of valley topography on dam body, thus promoting the development of the separation between concrete face and cushion layer. However, when the width-to-height ratio of valley *T* is greater than 2.0, its sensitivity on separation between concrete face and cushion layer is significantly reduced. The increase of the overburden thickness *F* promotes the nonuniform settlement of the dam body, and causes the area of separation between concrete face and cushion layer to gradually expand to the bottom. On the other hand, the sensitivity of the separation between concrete face and cushion layer decreases as the thickness of the cover layer increases. At the same time, due to the difference in deformation characteristics between the concrete face and the rockfill, the area of separation between concrete face and cushion layer expands slowly under the action of the cyclic rise-fall of reservoir water level and eventually stabilizes. Among the three, *F* has the highest sensitivity to the maximum depth of separation of concrete face and *T* has the highest sensitivity to the downhill length of separation. The research results in this paper can provide the corresponding theoretical basis for the prevention and treatment of separation between concrete face and cushion layer.

Key words: separation between concrete face and cushion layer; sensitivity analysis; width-to-height ratio of valley; overburden thickness; cyclic rise-fall of reservoir water level

随着社会需求的提高以及筑坝技术的进步，混凝土面板堆石坝的工程规模不断扩大，并逐渐向高坝大库发展，而混凝土面板的脱空问题一直是制约堆石坝发展的主要原因之一[1-2]。混凝土面板作为一种长条形薄板，主要由坝体堆石料对其起到支撑作用。然而，由于坝体堆石料的变形模量与混凝土面板相差悬殊，因此局部混凝土面板与堆石体的变形无法协调一致，从而导致该处面板与垫层料出现脱离现象[3-4]，在水压力作用下，脱空的混凝土面板会发生弯曲变形，并产生较大的拉应力[5]，当拉应力值超过面板混凝土抗拉强度时，面板就会出现结构性裂缝，与温度裂缝及干缩裂缝不同，结构性裂缝多为贯穿性裂缝[6]，会导致堆石坝防渗系统局部失效，严重威胁着面板堆石坝的运行安全[7-8]。

目前，众多专家学者开展了关于混凝土面板脱空问题的研究，针对面板脱空区域的接触问题，张丙印等[9]提出了基于直接约束法和库仑摩擦定律的面板脱空模拟方法；Zhang 等[10]提出了一种弹塑性损伤界面单元，用以准确模拟面板与垫层分离与重接触的力学特性，并论证了堆石体的施工过程会影响面板的脱空程度；Qian 等[11]比较分析了界面单元、薄层单元以及接触分析法对混凝土面板脱空的模拟精度。从面板脱空机理出发，王登银等[12]提出面板浇筑前堆石料沉降速率过快以及初次蓄水水位上升过快均是导致面板脱空的重要原因；赵欠南[13]研究了面板不同区域脱空对面板力学性能的影响，并分析了各脱空区域之间的相互作用。在面板脱空数值模拟方面，王翔南等[14]提出了一种基于扩展有限元法的面板脱空模拟方法，该方法无需增加特殊的界面单元，降低了建模成本，并通过与常规接触单元计算结果对比分析，验证了该模拟方法的可行性。在面板脱空影响因素方面，张丙印等[15]研究了堆石体流变变形对混凝土面板脱空及垫层料亏坡的影响；沈长松等[16]研究了不同面板施工过程、垫层料、堆石料以及蓄水过程对面板脱空的影响，并提出了防止及降低面板脱空的措施；王瑞骏等[17]采用子模型法研究了混凝土面板与堆石体分期施工高差对面板脱空变形特征的影响，同时考虑了流变的影响；冯燕明等[18]研究了堆石体流变变形、施工工序以及筑坝材料力学特性对 200 m 级高面板堆石坝面板脱空的影响。综上，造成混凝土面板脱空的最根本原因是面板与堆石体变形的不协调问题，而堆石坝坝址区地形地质条件及水库水位循环升降过程均对混凝土面板及堆石料的应力变形有着显著的影响[19]，但目前关于地形地质条件及水库水位循环升降对混凝土面板脱空影响敏感性的研究仍较少。

鉴于以上原因，本研究采用子模型法以更准确地模拟不同河谷宽高比、覆盖层厚度以及库水位循环条件下混凝土面板的应力变形情况，采用相对变位法研究了各因素对混凝土面板脱空变形特征的敏

感性,进而为面板脱空问题的防治提供相应的理论依据,并确保堆石坝安全稳定的运行。

1 面板脱空数值模拟方法

针对面板脱空问题,过大的单元无法保障模拟的准确性,同时面板与垫层之间存在非线性接触问题[20],在计算过程中易发生计算无法收敛而终止的情况,而加密网格可显著改善以上问题。但针对混凝土面板堆石坝这种大型结构,过细的网格会造成过大的计算负担,时间成本也会相应提高。鉴于子模型法目前在工程结构分析中的应用已相对成熟,该方法在兼顾计算效率的同时,又能够保障结构的细节特征,提高计算精度,因此,综合考虑计算精度、计算效率以及收敛性 3 个方面后,本研究采用子模型法进行面板脱空数值模拟。

子模型分析方法是在全局粗模型分析的基础上,在关键区域建立更加精细的网格模型,以获得精确解。根据有限元基本理论,子模型法又称切割边界法或特定位移法[21],该方法认为对于所有结构存在以下平衡方程

$$\boldsymbol{K}\cdot\boldsymbol{U}=\boldsymbol{F} \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{K}$ 为刚度矩阵;$\boldsymbol{U}$ 为位移向量;$\boldsymbol{F}$ 为荷载向量。

假设 $\boldsymbol{U}$ 由部件 a 的位移向量 $\boldsymbol{U}_{\mathrm{a}}$ 及部件 b 的位移向量 $\boldsymbol{U}_{\mathrm{b}}$ 组成,其中 $\boldsymbol{U}_{\mathrm{b}}$ 已知,称为特定位移,则式(1)可写为

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{K}_{\mathrm{aa}} & \boldsymbol{K}_{\mathrm{ab}}\\ \boldsymbol{K}_{\mathrm{ba}} & \boldsymbol{K}_{\mathrm{bb}}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\boldsymbol{U}_{\mathrm{a}}\\ \boldsymbol{U}_{\mathrm{b}}\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\boldsymbol{F}_{\mathrm{a}}\\ \boldsymbol{F}_{\mathrm{b}}\end{Bmatrix} \tag{2}$$

式中:$\boldsymbol{K}_{\mathrm{aa}}$ 及 $\boldsymbol{K}_{\mathrm{bb}}$ 分别为部件 a 和部件 b 的刚度矩阵;$\boldsymbol{K}_{\mathrm{ab}}$ 及 $\boldsymbol{K}_{\mathrm{ba}}$ 为部件 a 和部件 b 之间的刚度矩阵;$\boldsymbol{F}_{\mathrm{a}}$ 及 $\boldsymbol{F}_{\mathrm{b}}$ 分别为部件 a 和部件 b 的荷载向量。

展开式(2)则有

$$\boldsymbol{K}_{\mathrm{aa}}\cdot\boldsymbol{U}_{\mathrm{a}}=\boldsymbol{F}_{\mathrm{a}}-\boldsymbol{K}_{\mathrm{ab}}\cdot\boldsymbol{U}_{\mathrm{b}} \tag{3}$$

从式(3)可以看出,特定位移 $\boldsymbol{U}_{\mathrm{b}}$ 是求得 $\boldsymbol{U}_{\mathrm{a}}$ 时荷载向量的一部分,换而言之,对于具有刚度的结构,其特定位移会对其产生相应的荷载效应,这也是子模型法的理论基础。因此针对混凝土面板脱空问题,子模型法计算步骤如下[22]。

1)创建全局模型,采用常规有限元方法模拟面板堆石坝施工蓄水过程,计算面板堆石坝应力变形,初步确定混凝土面板脱空区域。

2)创建子模型,针对面板脱空区域重新剖分密度更高的网格,并适当加密垫层区的网格。

3)以子模型边界上全局模型的位移计算结果作为子模型计算的驱动变量。

4)设置子模型的边界条件。

5)提交子模型进行计算,准确的模拟混凝土面板的脱空变形特征。

2 数值计算模型

2.1 基础剖面

本研究依托某坝址处河谷近似呈"V"形河谷的面板堆石坝开展研究,坝体最大横剖面如图 1 所示[23],大坝坝顶高程 1 147.7 m,坝底高程 968.2 m,坝顶长度为 427.79 m,宽度为 10.95 m;大坝上游坡度为 1∶1.4,下游坡度为 1∶1.25;混凝土面板顶部厚度为 0.3 m,底部最大厚度为 0.9 m。

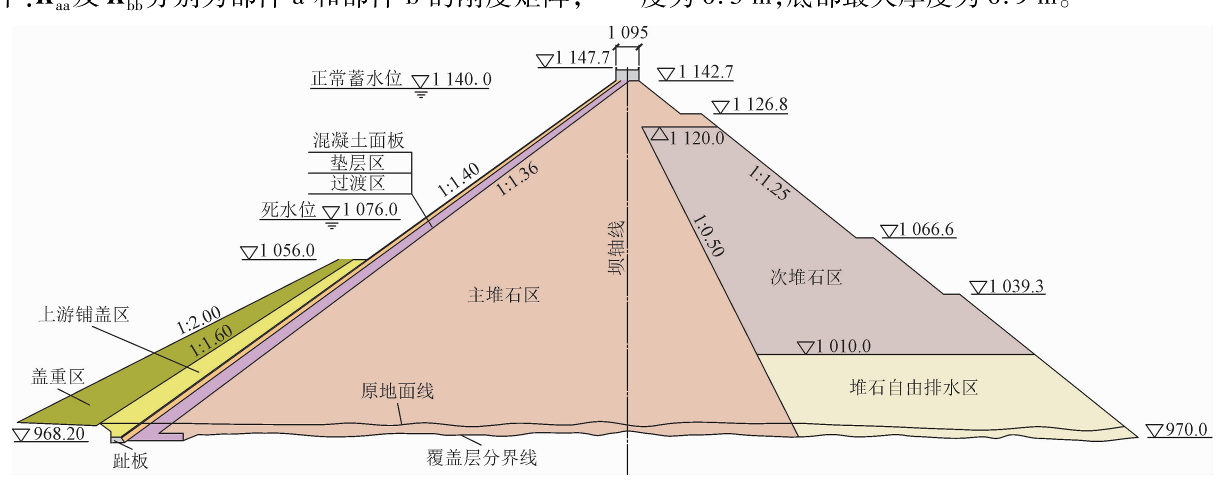


图 1 坝体最大横剖面图

Fig. 1 Maximum cross section of the dam

2.2　计算方案

本研究共拟定 3 组计算方案，如表 1 所示。其中 A 组旨在研究河谷形状对面板脱空的敏感性，各方案河谷宽高比分别取 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0，坝底均无覆盖层且不考虑水库水位循环升降；B 组旨在研究覆盖层厚度对面板脱空的敏感性，各方案坝底覆盖层厚度分别取 0、10、20、30、40 m，河谷宽高比均取 2.0 且不考虑水库水位循环升降；C 组旨在研究水库水位循环升降次数对面板脱空的敏感性，各方案水库水位循环升降次数分别取 0 次、1 次、4 次、8 次、16 次，其中以库水位由正常蓄水位1 140.0 m降至死水位1 076.0 m，再由死水位1 076.0 m升至正常蓄水位 1 140.0 m 记为 1 次完整的循环升降，同时，各方案河谷宽高比均取 2.0 且坝底无覆盖层。各组计算方案详情如表 1 所示。

2.3　计算模型及加载过程

根据图 1 所示的坝体最大横剖面图及表 1 中的计算方案，分别建立各方案三维有限元计算模型，由于自由排水区对面板脱空的影响可以忽略不计，为了简化模型，故采用次堆石区替代自由排水区。图 2 为 B 组 F20 方案的三维有限元计算模型，为了更加直观的了解坝体分区情况，选取大坝河床段中纵剖面进行剖切，如图 2 所示， 坝体河床宽度 $W = 40$ m，坝体高度为 H，坝轴线长度为 L，则河谷宽高比 $T = L/H$，覆盖层厚度为 F，基岩及岸坡分别向上下游及左右岸方向延伸 1 倍坝高 H；模型以顺水流方向为 x 轴方向，指向下游为正，以垂直水流方向为 y 轴方向，指向左岸为正，以竖直方向为 z 轴方向，指向上为正；模型底面施加固定约束，上下游及左右岸面施加简支约束；模型采用八节点六面体单元进行剖分，共有单元 65 614 个，节点 74 647 个。

表 1　计算方案

Tab. 1　Calculation scheme

组别	编号	T	F/m	K/次
A 组	T1.0	1.0	0	0
	T1.5	1.5	0	0
	T2.0	2.0	0	0
	T2.5	2.5	0	0
	T3.0	3.0	0	0
B 组	F0	2.0	0	0
	F10	2.0	10	0
	F20	2.0	20	0
	F30	2.0	30	0
	F40	2.0	40	0
C 组	K0	2.0	0	0
	K1	2.0	0	1
	K4	2.0	0	4
	K8	2.0	0	8
	K16	2.0	0	16

注：T 为河谷宽高比；F 为覆盖层厚度；K 为库水位循环次数。

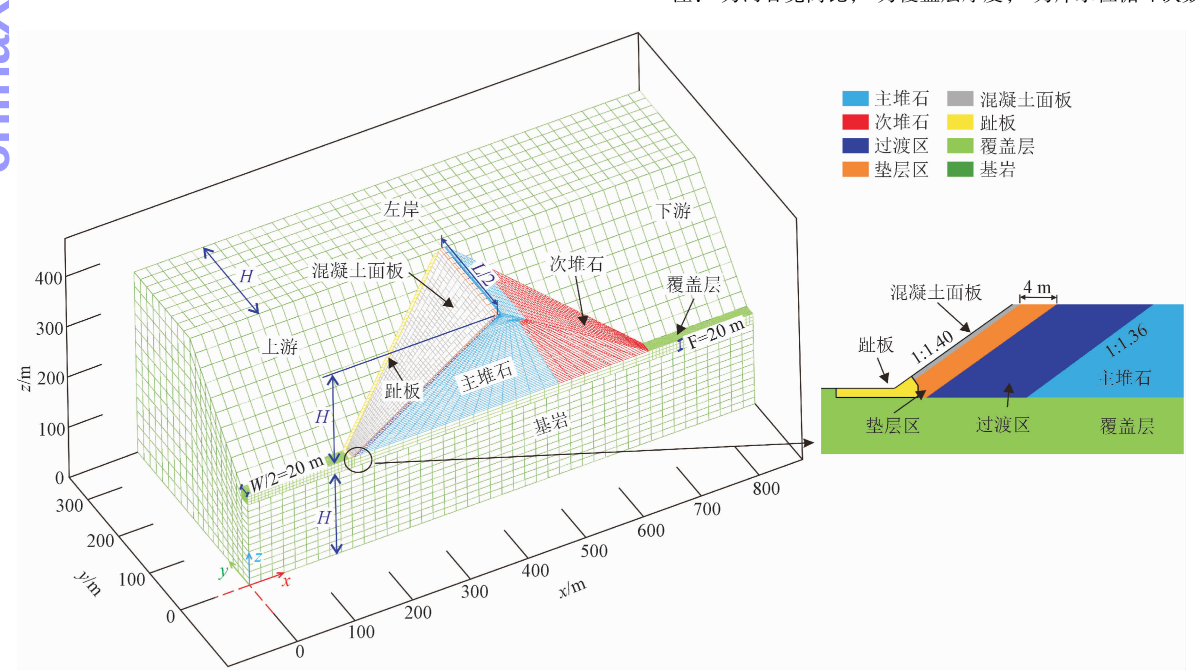


图 2　B 组 F20 方案三维有限元计算模型

Fig. 2　Three-dimensional finite element calculation model of F20 in group B

根据大坝实际施工顺序及蓄水过程开展有限元数值模拟,堆石体分 18 个分析步进行填筑,面板分 3 期浇筑,各期面板顶部高程分别为 1 028.0、1 088.0 及 1 142.7 m,水库水位分 3 级蓄至正常蓄水位,各级蓄水水位分别为 1 028.0、1 088.0 及 1 140.0 m。

根据建立的三维有限元计算模型,采用第 2 节介绍的面板脱空模拟方法开展各方案混凝土面板脱空计算。

2.4 计算参数

本研究面板、趾板及基岩采用线弹性模型进行模拟,计算参数如表 2 所示。堆石料采用邓肯-张 E-B模型进行模拟,材料参数由相关试验及相似工程类比获得[23-24],如表 3 所示。

采用 Goodman 无厚度单元[25]模拟面板及垫层之间的接触特性,由于缺少相关参数,因此参数取值依据常规 Goodman 接触模型参数,如表 4 所示。趾板与面板之间的设置摩擦接触,摩擦系数取 0.35。

表 2 线弹性模型参数

Tab. 2 Parameters of linear elastic model

材料	$\rho/(\mathrm{g\cdot cm^{-3}})$	E/GPa	μ
混凝土面板	2.45	30	0.167
趾板	2.45	30	0.167
基岩	2.70	10	0.250

注:ρ 为密度;E 为弹性模量;μ 为泊松比。

表 3 堆石料邓肯-张 E-B 模型参数

Tab. 3 Duncan-Chang E-B model parameters of rockfill

材料	$\rho/(\mathrm{g\cdot cm^{-3}})$	c/kPa	$\varphi_0/(°)$	K	n	K_b	R_f	m	K_{ur}
过渡区	2.19	0	53	1 050	0.43	620	0.867	0.24	2 150
垫层区	2.21	0	52	1 100	0.40	680	0.865	0.21	2 250
主堆石	2.18	0	53	1 000	0.47	600	0.870	0.40	2 050
次堆石	2.12	0	52	850	0.36	580	0.290	0.30	1 750
覆盖层	2.18	0	48.7	900	0.47	458	0.85	0.23	1 800

注:ρ 为密度;c 为凝聚力;φ_0 为初始内摩擦角;K 为初始弹性模量基数;n 为弹性模量指数;K_b 为初始体积模量基数;R_f 为破坏比;m 为体积模量指数;K_{ur} 为材料卸荷再加荷时的弹性模量[25-26]。

表 4 接触面模型参数

Tab. 4 Parameters of contact surface model

接触面	K_1	K_2	n_1	R_f	$\delta/(°)$	$\gamma_w/(\mathrm{kN\cdot m^{-3}})$	P_a/kPa
混凝土面板与垫层	2 000	2 000	0.53	0.70	55.2	9.8	100

注:K_1、K_2 为两个方向摩擦力的剪切模量系数;n_1 为剪切模量指数;δ 为接触面的界面摩擦角;γ_w 为水的容重;P_a 为大气压[25,27]。

3 计算结果分析

计算结果表明各方案面板脱空区域均主要集中在河床段中上部,并向上下端及两岸方向逐渐减小,直至闭合无脱空,故本研究采用相对变位法(即对比面板底部及垫层料表面的挠曲变形)提取各方案河床段面板脱空分布情况进行对比分析,以研究河谷宽高比、覆盖层厚度及库水位循环升降对混凝土面板脱空的敏感性。

3.1 不同河谷宽高比下面板脱空特征值分析

A 组各方案河床段面板脱空分布情况如图 3 及图 4 所示,图 3 为不同河谷宽高比下河床段混凝土面板脱空分布图,图 4 为混凝土面板脱空特征值随河谷宽高比变化趋势图。

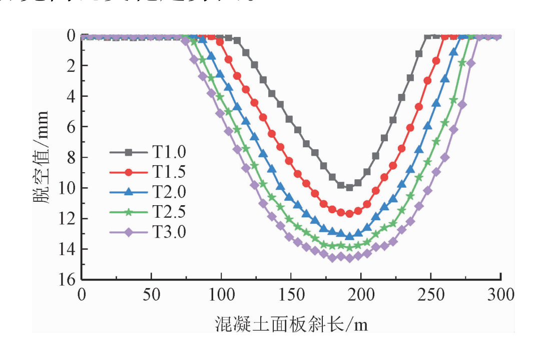


图 3 不同河谷宽高比下河床段混凝土面板脱空分布图

Fig. 3 Distribution map of separation between concrete face and cushion layer in the riverbed section under different width-to-height ratio of valley

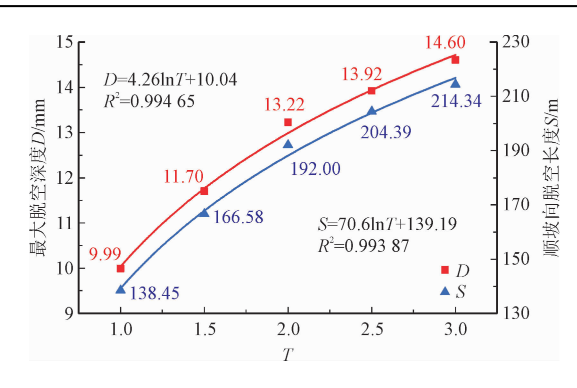


图 4　混凝土面板脱空特征值随河谷宽高比变化趋势图

Fig. 4　The trend graph of the characteristic value of separation between concrete face and cushion layer with the width-to-height ratio of valley

从图 3 可以看出，随着河谷宽高比 T 的增大，河床段混凝土面板最大脱空深度 D 及顺坡向脱空长度 S 均呈现逐渐增大的趋势，究其原因，主要是由于河谷宽高比 T 的增大会使得河谷拱效应降低，并削弱河谷地形对面板堆石坝应力变形的约束[28]，继而导致面板与堆石体变形增大，并加剧了面板与堆石体之间变形的不协调性并促使更多区域面板产生脱空。

从图 4 可以看出，混凝土面板最大脱空深度 D 及顺坡向脱空长度 S 随河谷宽高比 T 的增大呈对数形式增大，面板最大脱空深度 D 依次增大 1.71、1.52、0.70 及 0.68 mm，顺坡向最大脱空长度 S 依次增大 28.13、25.42、12.39 及9.95 m。同时可以看出，当河谷宽高比大于 2.0 时，其对面板脱空的敏感性会显著降低，因此建议在实际工程中，宜优先考虑选择河谷宽高比大于 2.0 的坝址区。

3.2　不同覆盖层厚度下面板脱空特征值分析

B 组各方案河床段面板脱空分布情况如图 5 及图 6 所示，图 5 为不同覆盖层厚度下河床段混凝土面板脱空分布图，图 6 为混凝土面板脱空特征值随覆盖层厚度变化趋势图。

从图 5 及图 6 可以看出，覆盖层的存在会产生较大压缩变形，从而加剧大坝的不均匀沉降，使得面板和堆石体之间的不协调变形更加显著[29]，进而促使面板的脱空区域增大，并且覆盖层的存在会导致堆石体的变形向底部发展，因此随着覆盖层厚度 F 的增大混凝土面板脱空区域会逐渐向底部发生扩展。

同样，混凝土面板最大脱空深度 D 及顺坡向脱空长度 S 随覆盖层厚度 F 的增大呈对数形式增长，究其原因是因为覆盖层厚度越大，其深处区域对坝体不均匀沉降的影响程度越小，因此，随着覆盖层厚度 F 的增大，面板最大脱空深度 D 依次增大 3.42、2.79、2.30 及 1.12 mm，顺坡向最大脱空长度 S 依次增大 14.53、12.25、10.38 及 5.20 m。在实际工程中，需对覆盖层地基采取加固处理，以改善坝体不均匀沉降，并预防混凝土面板脱空的扩展。

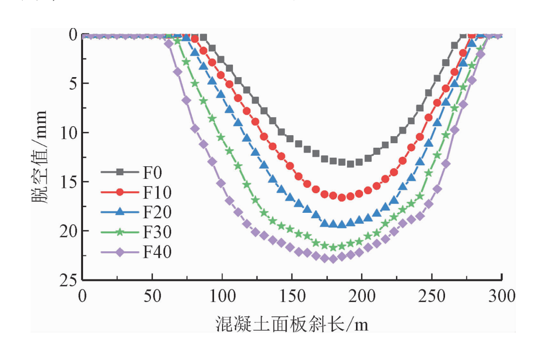


图 5　不同厚度覆盖层下河床段混凝土面板脱空分布图

Fig. 5　Distribution map of separation between concrete face and cushion layer in the riverbed section under different overburden thickness

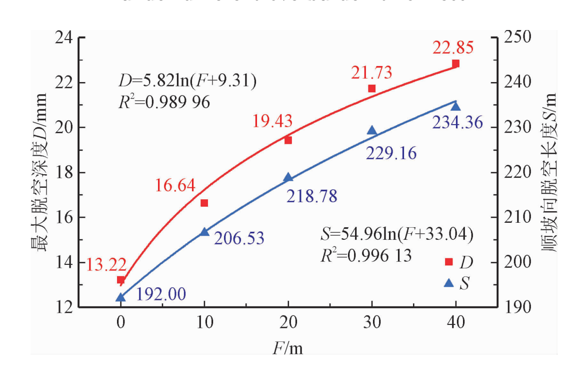


图 6　混凝土面板脱空特征值随覆盖层厚度变化趋势图

Fig. 6　The trend graph of the characteristic value of separation between concrete face and cushion layer with the overburden thickness

3.3　不同库水位循环升降次数下面板脱空特征值分析

C 组各方案河床段面板脱空分布情况如图 7 及图 8 所示，图 7 为不同水位循环升降次数下河床段混凝土面板脱空分布图，图 8 为混凝土面板脱空特征值随库水位循环升降次数变化趋势图。

由图 7 及图 8 可以看出，由于库水位循环升降的作用，导致面板与堆石体变形增大，但因为堆石料变形具有非线性特性，堆石体变形的增量大于面板，从而加剧了面板与堆石体之间的不协调变形，导致面板脱空的进一步发展，同时，由于面板底部承受水荷载相比于顶部更大，因此面板底部脱空区域更易

扩展。

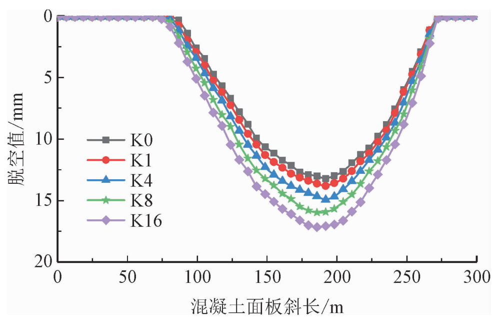


图 7　不同库水位循环升降次数下河床段混凝土面板脱空分布图

Fig. 7　Distribution map of separation between concrete face and cushion layer in the riverbed section under different times of cyclic rise-fall of reservoir water level

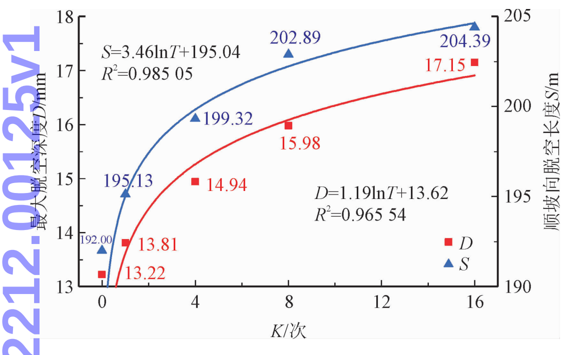


图 8　混凝土面板脱空特征值随库水位循环升降次数变化趋势图

Fig. 8　The trend of the characteristic value of separation between concrete face and cushion layer with the times of cyclic rise-fall of reservoir water level

随着水位循环升降次数 K 的增加，混凝土面板最大脱空深度 D 及顺坡向脱空长度 S 亦呈对数形式增长，面板最大脱空深度 D 依次增大 0.59、1.13、1.04 及 1.17 mm，顺坡向最大脱空长度 S 依次增大 3.13、4.19、3.57 及 1.50 m。可以看出，在库水位循环升降作用下，混凝土面板脱空区域的扩展会逐渐趋于稳定。

3.4　各影响因素对面板脱空特征值敏感性分析

本研究采用单因素分析法分析各影响因素对面板脱空特征值的敏感性程度，参考文献[30]中定义的敏感度因子，则敏感度因子 $Z(a)$ 为

$$Z(a)=\max\left\{\left(\frac{U_{\max}-U_i}{U_i}\right),\left(\frac{U_i-U_{\min}}{U_i}\right)\right\}\qquad(4)$$

式中：$Z(a)$ 为影响因素 a 的敏感度；U_i 为影响因素 a 在 i 水平的特征值；$U_{\max}$、$U_{\min}$ 分别为影响因素 a 各水平对应特征值的最大值和最小值。

可以看出，通过式(4)即可求得各影响因素对面板脱空特征值的敏感度，敏感性度 $Z(a)$ 值越大，说明该影响因素对特征值的敏感性越高。则根据各方案面板脱空区域特征值求得各影响因素敏感度如表 5 所示。

表 5　各影响因素对面板脱空特征值敏感度

Tab. 5　Sensitivity of each influencing factor to the characteristic value of separation between concrete face and cushion layer

特征值	敏感度		
	T	F	K
D	0.461	0.728	0.297
S	0.548	0.221	0.065

从表 5 可以看出，河谷宽高比 T 对顺坡向脱空长度 S 的敏感性大于最大脱空深度 D，覆盖层厚度 F 及库水位循环升降次数 K 对最大脱空深度 D 的敏感性大于顺坡向脱空长度 S。对于面板最大脱空深度 D 的敏感性，覆盖层厚度 $F>$ 河谷宽高比 $T>$ 库水位循环升降次数 K，而对于顺坡向脱空长度 S 的敏感性，河谷宽高比 $T>$ 覆盖层厚度 $F>$ 库水位循环升降次数 K，这主要是因为覆盖层主要影响堆石体的沉降变形，而对河谷的约束作用影响较小，同时库水位循环升降对堆石料变形的影响相对较小，且在库水位循环升降作用下，堆石体会逐渐密实，垫层料与面板之间的不协调变形难以进一步发展。

4　结　论

本研究采用子模型法准确地模拟了堆石坝的应力变形，探究了河谷宽高比 T、覆盖层厚度 F 及库水位循环升降次数 K 对混凝土面板脱空的敏感性，得出以下结论。

1）河谷宽高比 T 的增大会降低河谷的拱效应并削弱河谷地形对坝体的约束作用，促进了面板脱空的进一步发展，但当河谷宽高比大于 2.0 时，河谷地形对混凝土面板脱空的敏感性会明显降低。

2）覆盖层加剧了坝体的不均匀沉降，促进了面板与堆石体之间变形的不协调特性，同时，覆盖层的存在致使坝体变形偏向底部，从而导致面板脱空区域逐渐向底部扩展，但覆盖层对混凝土面板的敏感性会随着覆盖层厚度 F 的增加而降低。

3）由于面板与堆石料材料应力变形特性的不同，因此在库水位循环作用下，面板脱空会发生扩展，且面板底部相较于顶部更易扩展。

4)混凝土面板最大脱空深度 D 及顺坡向脱空长度 S 随着河谷宽高比 T、覆盖层厚度 F 及库水位循环升降次数 K 的增大呈对数形式增长。对于面板最大脱空深度 D 的敏感性，覆盖层厚度 F > 河谷宽高比 T > 库水位循环升降次数 K；对于顺坡向脱空长度 S 的敏感性，河谷宽高比 T > 覆盖层厚度 F > 库水位循环升降次数 K。

参考文献：

[1] 钮新强. 高面板堆石坝安全与思考[J]. 水力发电学报，2017，36(1)：104-111.
NIU Xinqiang. Security of high concrete face rockfill dam consideration and conclusion[J]. Journal of hydroelectric engineering, 2017,36(1):104-111(in Chinese).

[2] 郦能惠. 高混凝土面板堆石坝设计新理念[J]. 中国工程科学，2011，13(3)：12-18.
LI Nenghui. New concept of design for high concrete face rockfill dams[J]. Strategic study of CAE, 2011, 13(3): 12-18(in Chinese).

[3] 徐泽平. 混凝土面板堆石坝关键技术与研究进展[J]. 水利学报，2019，50(1)：62-74.
XU Zeping. Research progresses and key technologies of CFRD construction[J]. Journal of hydraulic engineering, 2019, 50(1): 62-74(in Chinese).

[4] KIM Y S, KIM B T. Prediction of relative crest settlement of concrete-faced rockfill dams analyzed using an artificial neural network model[J]. Computers and geotechnics, 2008, 35(3): 313-322.

[5] 刘国明，陈泽钦，林伯江. 基于堆石体 Wang-Wu 亚塑性本构模型的混凝土面板坝应力变形分析[J]. 水力发电学报，2017，36(1)：75-85.
LIU Guoming, CHEN Zeqin, LI Bojiang. Stress and deformation analysis of CFRD using Wang-Wu hypoplastic constitutive model for rockfill[J]. Journal of hydroelectric engineering, 2017, 36(1): 75-85(in Chinese).

[6] 杨超，党发宁，薛海斌，等. 峡谷地区高堆石坝面板结构性拉裂破坏机理及改善措施[J]. 水力发电学报，2017，36(4)：95-103.
YANG Chao, DANG Faning, XUE Haibin, et al. Mechanism of structural tensile damage to concrete face slabs of high CFRDs in narrow valley regions and improvements[J]. Journal of hydroelectric engineering, 2017, 36(4): 95-103(in Chinese).

[7] 孔宪京，张宇，邹德高. 高面板堆石坝面板应力分布特性及其规律[J]. 水利学报，2013，44(6)：631-639.
KONG Xianjing, ZHANG Yu, ZOU Degao. Study on the stress distribution characteristics of face-slab of high concrete-face rock-fill dam[J]. Journal of hydraulic engineering, 2013, 44(6): 631-639(in Chinese).

[8] 宋文晶，孙役，李亮，等. 水布垭面板堆石坝第一期面板裂缝成因分析及处理[J]. 水力发电学报，2008，27(3)：33-37.
SONG Wenjing, SUN Yi, LI Liang, et al. Reason analysis and treatment for the 1st phase slab cracking of Shuibuya CFRD[J]. Journal of hydroelectric engineering, 2008, 27(3): 33-37(in Chinese).

[9] 张丙印，师瑞锋，王刚. 高面板堆石坝面板脱空问题的接触力学分析[J]. 岩土工程学报，2003，25(3)：361-364.
ZHANG Bingyin, SHI Ruifeng, WANG Gang. Contact analysis of separation between concrete slab and cushion layer in high concrete face rock-fill dam[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2003, 25(3): 361-364(in Chinese).

[10] ZHANG G, ZHANG J M. Numerical modeling of soil-structure interface of a concrete-faced rockfill dam[J]. Computers and geotechnics, 2009, 36(5): 762-772.

[11] QIAN X X, YUAN H N, LI Q M, et al. Comparative study on interface elements, thin-layer elements, and contact analysis methods in the analysis of high concrete-faced rockfill dams[J]. Journal of applied mathematics, 2013, 2013: 320890.

[12] 王登银，陈振文，汤旸，等. 巴山水电站高折线面板堆石坝运行性状研究[J]. 岩土工程学报，2011，33(9)：1483-1488.
WANG Dengyin, CHEN Zhenwen, TANG Yang, et al. Behaviors of high broken line concrete face rockfill dam of Bashan hydropower station[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2011, 33(9): 1483-1488(in Chinese).

[13] 赵欠南. 面板堆石坝脱空数值模拟研究[D]. 大连：大连理工大学，2013.

[14] 王翔南，郝青硕，喻葭临，等. 基于扩展有限元法的大坝面板脱空三维模拟分析[J]. 岩土力学，2020，41(增刊 1)：329-336.
WANG Xiangnan, HE Qingshuo, YU Jialin, et al. Three-dimensional simulation of the separation of dam panel based on extended finite element method[J]. Rock and soil mechanics, 2020, 41(S1): 329-336(in Chinese).

[15] 张丙印，师瑞锋. 流变变形对高面板堆石坝面板脱空的影响分析[J]. 岩土力学，2004，25(8)：1179-1184.
ZHANG Bingyin, SHI Ruifeng. Influence of creeping on separation between concrete slab and cushion layer in high concrete face rock-fill dam[J]. Rock and soil mechanics, 2004, 25(8): 1179-1184(in Chinese).

[16] 沈长松，李艳丽，郑福寿. 面板堆石坝面板脱空现象成因分析及预防措施[J]. 河海大学学报(自然科学版)，2006，34(6)：635-639.
SHEN Changsong, LI Yanli, ZHENG Fushou. Causes of formation of interspace between slab and cushion layer of CFRD and measures for its prevention[J]. Journal of Hohai University (natural sciences), 2006, 34(6): 635-639(in Chinese).

[17] 王瑞骏，薛一峰，杜鑫. 面板与坝体的分期施工高差对面板脱空变形的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2014，42(10)：205-210.
WANG Ruijun, XUE Yifeng, DU Xin. Effect of height difference in stage construction on the separation deformation between concrete face slab and cushion layer of CFRD[J]. Journal of Northwest A &

F University (natural science edition),2014,42(10):205-210(in Chinese).

[18] 冯燕明,张礼兵,华春莉. 200 m 级面板堆石坝面板脱空影响因素分析[J]. 水电能源科学,2016,34(2):73-76.
FENG Yanming,ZHANG Libing,HUA Chunli. Study on influence on separation between concrete slab and cushion layer in 200 m concrete faced rock-fill dam[J]. Water resources and power,2016,34(2):73-76(in Chinese).

[19] 党发宁,杨超,薛海斌,等. 河谷形状对面板堆石坝变形特性的影响研究[J]. 水利学报,2014,45(4):435-442.
DANG Faning,YANG Chao,XUE Haibin,et al. The effect of valley topography on deformation properties of CFRD[J]. Journal of hydraulic engineering,2014,45(4):435-442(in Chinese).

[20] 刘京茂,孔宪京,邹德高. 接触面模型对面板与垫层间接触变形及面板应力的影响[J]. 岩土工程学报,2015,37(4):700-710.
LIU Jingmao, KONG Xianjing, ZOU Degao. Effects of interface models on deformation of interface between slab and cushion layer and slab stress of concrete faced rock fill dam[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2015,37(4):700-710(in Chinese).

[21] SUN Y T,ZHANG J J,ZHANG Q,et al. Research of large scale mechanical structure crack growth method based on finite element parametric submodel[J]. Engineering failure analysis,2019,102:226-236.

[22] 石亦平,周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京:机械工业出版社,2006.

[23] 王瑞骏,刘伟,卢志男. 河谷宽高比对面板堆石坝应力变形的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(6):227-234.
WANG Ruijun,LIU Wei,LU Zhinan. Effect of valley width/height ration on stress deformation of rock-fill dam[J]. Journal of Northwest A & F University (natural science edition),2014,42(6):227-234(in Chinese).

[24] 潘家军,饶锡保,周欣华,等. 深厚覆盖层上面板堆石坝新型结构应力变形性状影响因素研究[J]. 水利学报,2015,46(增刊1):163-167.
PAN Jiajun,RAO Xibao,ZHOU Xinhua,et al. Research on influence factors of stress-deformation behavior of new structure for concrete face rockfill dam on deep overburnden[J]. Journal of hydraulic engineering,2015,46(S1):163-167(in Chinese).

[25] 涂幸,李守义,李炎隆,等. 沥青混凝土心墙堆石坝应力变形有限元分析[J]. 应用力学学报,2016,33(1):110-115.
TU Xing,LI Shouyi,LI Yanlong,et al. Finite element analysis of stress and deformation on rockfill dam with asphaltic concrete core wall[J]. Chinese journal of applied mechanics,2016,33(1):110-115(in Chinese).

[26] 李炎隆,李守义,丁占峰,等. 基于正交试验法的邓肯-张 E-B 模型参数敏感性分析研究[J]. 水利学报,2013,44(7):873-879.
LI Yanlong,LI Shouyi,DING Zhanfeng,et al. The sensitivity analysis of Duncan-Chang E-B model parameters based on the orthogonal test method[J]. Journal of hydraulic engineering,2013,44(7):873-879(in Chinese).

[27] 李炎隆,张再望,卜鹏,等. 镶嵌面板坝高模量区优化设计研究[J]. 应用力学学报,2018,35(2):358-364.
LI Yanlong,ZHANG Zaiwang,BU Peng,et al. The optimization design of high modulus zone to inlaid concrete faced rockfill dam[J]. Chinese journal of applied mechanics,2018,35(2):358-364(in Chinese).

[28] 程嵩,张嘎,张建民,等. 河谷地形对面板堆石坝应力位移影响的分析[J]. 水力发电学报,2008,27(5):53-58.
CHEN Song,ZHANG Ga,ZHANG Jianmin,et al. Effect of foundation topography on the stress-displacement response of concrete faced rockfill dam[J]. Journal of hydroelectric engineering,2008,27(5):53-58(in Chinese).

[29] 温立峰,柴军瑞,王晓. 深覆盖层上面板堆石坝应力变形特性研究[J]. 岩土力学,2015,36(8):2386-2394.
WEN Lifeng,CHAI Junrui,WANG Xiao. Stress-deformation behavior of a concrete-faced rockfill dam with a deep overburden foundation[J]. Rock and soil mechanics,2015,36(8):2386-2394(in Chinese).

[30] 侯哲生,李晓,王思敬,等. 金川二矿某巷道围岩力学参数对变形的敏感性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(3):406-410.
HOU Zhesheng,LI Xiao,WANG Sijing,et al. Sensitivity analysis of mechanical parameters to deformation of surrounding rocks for a tunnel in Jinchuan Deposit Ⅱ[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2005,24(3):406-410(in Chinese).

(编辑 史淑英)